

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СТАТИЧНОГО КОРОТКОЧАСНОГО ДЕФОРМУВАННЯ МУЛЬТИФІЛАМЕНТНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

Исследуются процессы статического кратковременного деформирования различных видов полимерных нитей. Испытания на растяжение выполнены на полипропиленовых и полиамидных образцах, с использованием специально разработанного роликового захватного устройства. Исследовано влияние различных режимов нагружения на процессы деформирования. Определены мгновенные диаграммы деформирования представленных волокнистых структур.

The processes of static short-term deformation of different types of polymeric threads are investigated. Experimental tensile tests were performed on polypropylene and polyamide-based samples by using specially engineered roller gripping device. The influence of various modes of loading on the processes of deformation is investigated. Instantaneous deformation diagrams of presented fibrous structures are determined.

Вступ.

На даний час з полімерних матеріалів виробляють хімічні волокна загального призначення (лінійною густиною від 0,11 до 1 текс), нитки (лінійною густиною від 3 до 250 текс) і монопнитки. Також випускають мікроволокна і мікронитки, багато видів фізично, композиційно та хімічно модифікованих волокон [1].

До окремого типу слід віднести технічні нитки – синтетичні нитки, що володіють підвищеною міцністю та зносостійкістю. Технічні високоміцні нитки мають більш високі значення модуля пружності й міцності та низькі значення видовжень при розриві.

Серед вищенаведених технічних ниток, а також хімічних волокон та ниток загального призначення найбільшого поширення набули поліефірні, поліпропіленові та аліфатичні поліамідні (найлон 6 та найлон 66) волокна і нитки.

В порівнянні з іншими видами полімерних матеріалів волокнисті полімерні структури мають цілий ряд особливостей, що обумовлені в першу чергу наявністю значної анізотропії структури та властивостей. Ця анізотропія пов'язана зі специфічною ланцюговою будовою молекул волокнуутворюючих полімерів, їх одновісною орієнтацією та високоупорядченою структурою. Наслідком цього є висока міцність і жорсткість волокон та ниток в осьовому напрямку та значно нижчі характеристики в поперечному напрямі.

Такі структури знаходять все ширше застосування при армуванні композиційних матеріалів. Їх використання дозволяє підвищити характеристики існуючих матеріалів та розробити оптимальні конструкції з наперед заданими властивостями. Без знання їх механічної поведінки при різних умовах експлуатації неможливе створення композиційних матеріалів та мультифіламентних полімерних систем із заданою анізотропією властивостей.

1. Експериментальна методика.

Особливістю полімерів є залежність їх фізико-механічних властивостей від атмосферних умов. Тому при підготовці до випробувань необхідним є кондиціонування зразків відповідно до загальноприйнятих стандартів [2, 3]. Досліджувану пробу зразків розправляли без порушення їх структури та витримували в стандартних

кліматичних умовах (температура $20 \pm 2^\circ\text{C}$ і відносна вологість $65 \pm 2\%$) на протязі 2 діб. Під час проведення випробувань також слідкували за дотриманням даних вимог.

Під час проведення експериментальних випробувань волокнистих полімерних матеріалів в умовах статичного короточасного навантаження визначались наступні ефективні механічні характеристики: граничні напруження та деформації в напрямку прикладених зусиль, модуль поздовжньої пружності, а також діаграма деформування.

Для дослідження характеристик міцності та процесів деформування було обрано два типи ниток загального призначення з найбільш вживаних полімерних матеріалів – поліпропілену і поліаміду та один вид високоміцних ниток з поліпропілену (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристики досліджуваних ниток

Тип нитки	Лінійна густина, текс	Кількість волокон	Крутка, кр/м	Густина, кг/м^3
Поліпропіленова LIPOLA/A-10	111	148	0	993,6
Поліамідна ПА-6.6	187	280	27	1140
Технічна поліпропіленова	1000	фібрильована структура	0	993,6

Визначення механічних характеристик досліджуваних ниток при статичному розтязі здійснювалося на експериментальних установках Instron 1126 та BiSS Bi-00-701. Вимоги до зразків, дослідного обладнання та швидкості навантаження регламентувалися міжнародними та вітчизняними стандартами [4, 5, 6].

На отримання якісних результатів випробувань значний вплив справляє оптимальна передача зусиль від захватів випробувальної установки до зразків. При експериментальному дослідженні волокнистих полімерних структур можливе виникнення декількох негативних факторів, які впливають на механічну поведінку матеріалу. Можливе проковзування ниток в зажимах випробувальних приладів, яке не тільки спотворює абсолютні характеристики (розривне навантаження та видовження), а й змінює величину і швидкість навантаження; перекошування зразків в результаті неспіввідповідності захватів; нерівномірне одночасне навантаження всіх волокон, що призводить до передчасного руйнування [7].

Виходячи з цього для статичних випробувань волокон та ниток при одновісному розтязі нами був розроблений роликотий захватний пристрій (рис. 1.).

Така конструкція захватного пристрою запобігає руйнуванню зразків в захватах випробувальної машини та забезпечує однорідність деформацій на робочій ділянці.

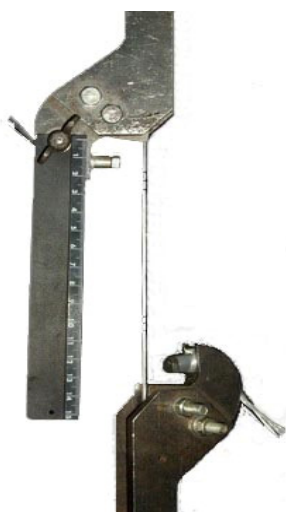


Рис.1. Роликотий захватний пристрій

Враховуючи неможливість кріплення на досліджувані нитки тензометрів, для вимірювання осьової деформації нами був використаний оптичний метод. На випробувану нитку наносилось декілька відміток, уникаючи пошкодження зразка. Абсолютна деформація між двома реперними крапками фіксувалась за допомогою цифрової фотозйомки, з наступною обробкою даних у креслярсько-графічному пакеті програм. Вимірювання виконувались на базі $100 \pm 10\text{мм}$.

2. Результати досліджень.

Для визначення ефективних механічних характеристик та побудови діаграми деформування ниток загального призначення випробування проводились за жорсткого режиму навантаження з постійною швидкістю переміщення, рівною 235 мм/хв [8, 9].

В результаті проведених досліджень були отримані наступні значення ефективних механічних характеристик. Для поліпропіленової нитки загального призначення LIPOLA/A-10 границя міцності та гранична деформація при розтязі складають відповідно $\sigma_b = 615,5$ МПа, $\varepsilon_b = 22,1\%$, модуль поздовжньої пружності $E_0 = 4510$ МПа.

Механічні характеристики поліамідної комплексної нитки на основі ПА-6.6 визначені наступними: границя міцності при розтязі $\sigma_b = 830$ МПа, деформація розриву $\varepsilon_b = 19\%$. Для даного матеріалу характерне нелінійне пружне деформування.

Діаграми деформування поліпропіленової та поліамідної ниток представлені на рис. 2.

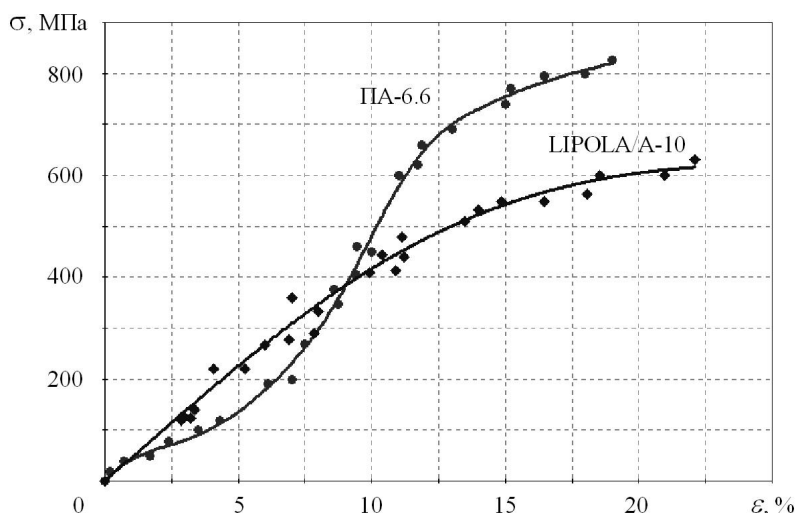


Рис. 2. Діаграми деформування поліпропіленової комплексної нитки LIPOLA/A-10 та поліамідної нитки на основі ПА-6.6

Як видно, діаграма розтягу поліамідної крученої нитки істотно відрізняється від аналогічної залежності для поліпропіленового матеріалу. Насамперед, на ній, практично, відсутня початкова прямолінійна ділянка деформування. Це пов'язане з тим, що при навантаженні комплексної крученої нитки спочатку відбувається її деформування в результаті розправлення витків окремих елементарних ниток, і лише потім їхнє видовження. Іншою особливістю даної діаграми розтягу можна назвати наявність на ній двох точок перегину.

Експериментальне дослідження поліпропіленової технічної нитки мало на меті не лише визначити механічні характеристики даної структури, а й дослідити вплив на процеси деформування різних режимів навантаження.

Були проведені короточасні статичні випробування на одновісний розтяг в жорсткому режимі з постійними швидкостями переміщення 20 мм/хв, 50 мм/хв, 120 мм/хв та 200 мм/хв, та в м'якому режимі зі швидкостями навантаження 0,2 кН/хв, 0,5 кН/хв та 1,2 кН/хв. Відповідні діаграми розтягу наведені на наступному рисунку.

Аналіз отриманих результатів показав суттєву залежність діаграм розтягу досліджених полімерних ниток від виду та швидкості навантаження, що свідчить про появу деформацій повзучості одразу після початку деформування. Це пов'язано в першу чергу з особливостями деформування полімерних матеріалів, для яких характерні реологічні властивості, а також з тим, що в початковий момент часу має місце нерівномірний розподіл навантаження по всіх елементарних волокнах нитки.

Тому нами була проведена робота по визначенню миттєвих діаграм деформування, які інваріантні до виду напруженого стану та швидкості деформації і які можуть розглядатись як дійсні діаграми властивостей даних волокнистих структур.

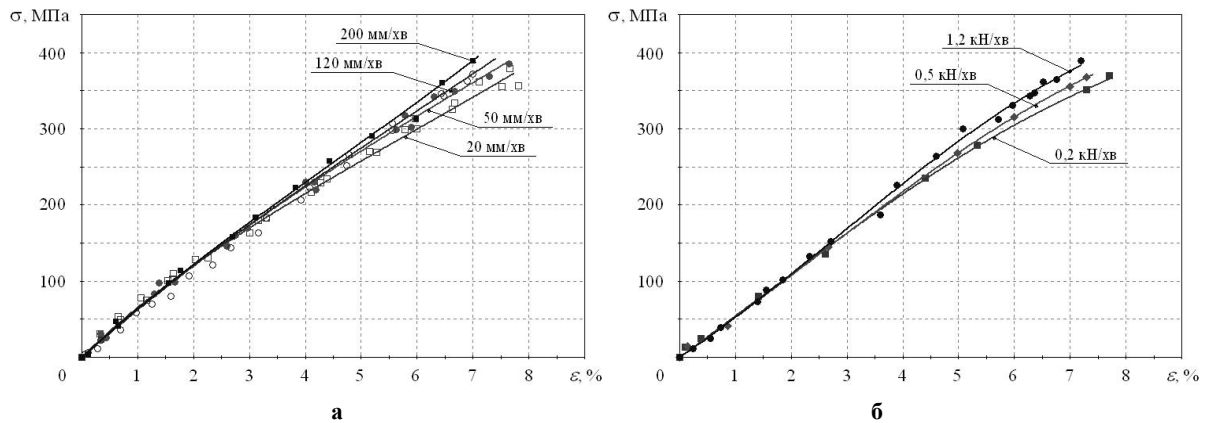


Рис. 3. Діаграми деформування поліпропіленової технічної нитки:
а – жорсткий режим навантаження; б – м'який режим навантаження

3. Визначення діаграми миттєвого деформування мультифіламентних полімерних матеріалів.

Припущення про існування миттєвої діаграми деформування (діаграми властивостей) лежить в основі більшості моделей непружного деформування. Під такою діаграмою розуміють залежність напруження від деформації, визначеної із дослідів на одноосовий розтяг зразків, яка інваріантна до виду напруженого стану та швидкості деформації. Тобто це ідеалізована крива, яка відповідає нескінченно малому, близькому до нуля, часу деформування [10, 11, 12].

Така діаграма властивостей визначається із серії кривих розтягу, які отримані при випробуваннях зразків з різними постійними швидкостями напруження, або обчислюється з аналізу сімейства ізохронних кривих повзучості.

Як відомо, ізохронні діаграми встановлюють зв'язок між напруженнями та деформаціями для фіксованих моментів часу і будуються по первинних кривих повзучості.

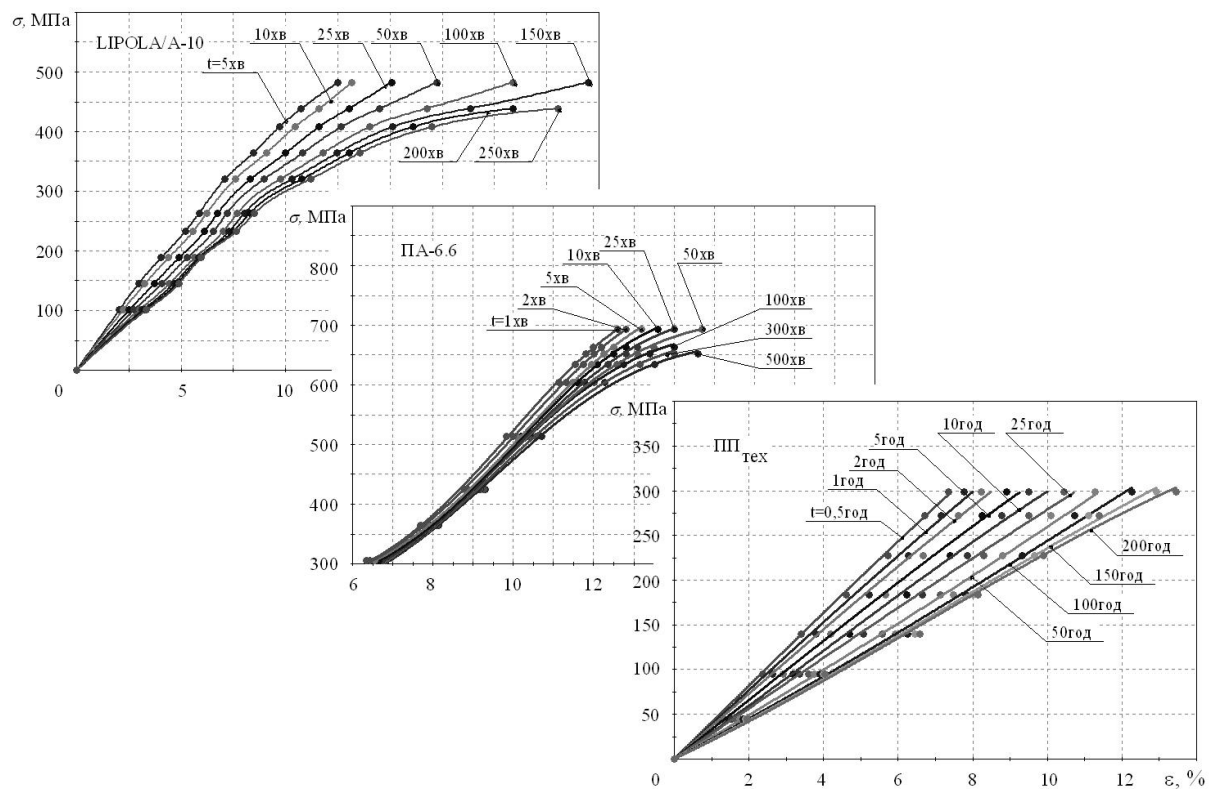


Рис. 4. Ізохронні діаграми повзучості поліпропіленової (LIPOLA/A-10), поліамідної (ПА-6.6) та технічної (ПП_{тех}) ниток

Використовуючи експериментально отримані криві повзучості поліпропіленової та поліамідної комплексних ниток, а також технічної поліпропіленової нитки були побудовані відповідні ізохронні діаграми повзучості даних матеріалів (рис. 4).

Позначимо через $\varphi_j(\varepsilon_i; t_j)$ – ізохронну криву для фіксованого моменту часу t_j і деформацій ε_i . Тоді осереднене значення коефіцієнта подібності ізохронних діаграм повзучості визначаємо з наступного виразу

$$\tilde{G}_j(\varphi_j; t_k) = \frac{\varphi_j(\varepsilon_i; t_j)}{\varphi_k(\varepsilon_i; t_k)} \quad (1)$$

де $\tilde{G}_j(\varphi_j; t_k)$ – осереднений коефіцієнт подібності j -ої ізохрони до k -ої ізохрони; $\varphi_k(\varepsilon_i; t_k)$ – ізохронна крива для фіксованого моменту часу t_k і деформацій ε_i .

Для прикладу розглянемо процес визначення миттєвої діаграми деформування для поліамідної комплексної нитки на основі ПА–6.6. Призначимо кожній ізохроні відповідний порядковий номер: $t_1 = 1\text{хв}$; $t_2 = 2\text{хв}$; $t_3 = 5\text{хв}$; $t_4 = 10\text{хв}$; $t_5 = 25\text{хв}$; $t_6 = 50\text{хв}$; $t_7 = 100\text{хв}$; $t_8 = 200\text{хв}$; $t_9 = 300\text{хв}$; $t_{10} = 400\text{хв}$; $t_{11} = 500\text{хв}$. І знайдемо осереднені коефіцієнти подібності між усіма ізохронами. Всі ці результати зведені до табл. 2.

Таблиця 2

Осереднені коефіцієнти подібності ізохрон поліамідної нитки

$\tilde{G}_j(\varphi_j; t_k)$											
$\begin{matrix} j \\ k \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	0,984	0,965	0,953	0,942	0,935	0,930	0,923	0,917	0,912	0,907
2	1,016	1	0,981	0,968	0,957	0,950	0,945	0,938	0,932	0,927	0,922
3	1,036	1,020	1	0,988	0,976	0,969	0,963	0,956	0,951	0,945	0,940
4	1,049	1,033	1,012	1	0,988	0,981	0,975	0,968	0,962	0,957	0,951
5	1,062	1,045	1,024	1,012	1	0,992	0,987	0,980	0,974	0,968	0,963
6	1,070	1,053	1,032	1,020	1,008	1	0,994	0,987	0,981	0,975	0,970
7	1,076	1,059	1,038	1,026	1,014	1,006	1	0,993	0,987	0,981	0,975
8	1,084	1,067	1,046	1,033	1,021	1,013	1,007	1	0,994	0,988	0,983
9	1,091	1,073	1,053	1,040	1,027	1,019	1,014	1,006	1	0,994	0,989
10	1,097	1,080	1,059	1,046	1,033	1,025	1,020	1,012	1,006	1	0,994
11	1,104	1,086	1,065	1,052	1,039	1,031	1,025	1,018	1,012	1,006	1

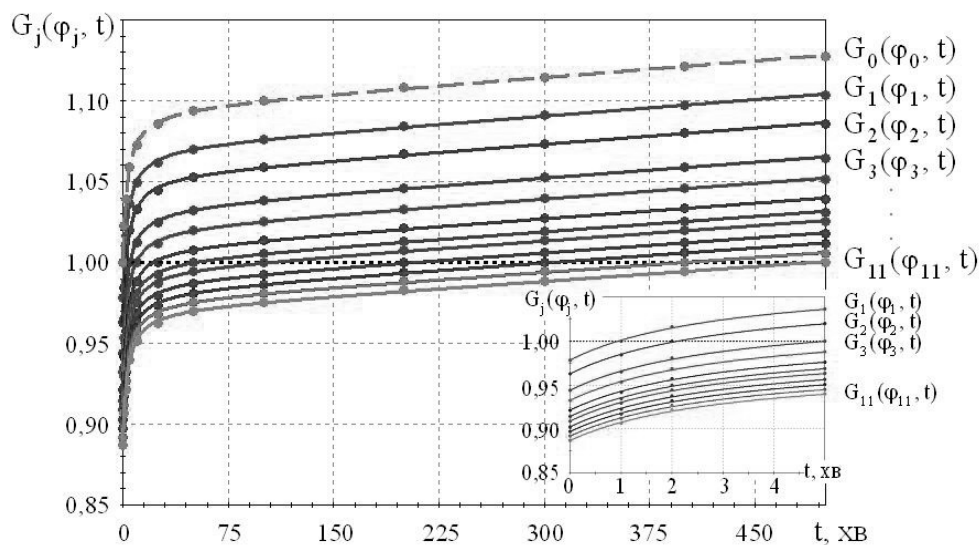


Рис. 5. Функції подібності ізохронних діаграм повзучості поліамідної нитки.

Позначимо через $G_j(\varphi_j; t)$ функції подібності j -ої ізохрони до всіх інших ізохрон, та представимо їх графічно (рис. 5).

Апроксимуємо функцій подібності ізохронних діаграм повзучості дробово-раціональними виразами

$$G_j(\varphi_j; t) = \frac{a_j + b_j \cdot t}{c_j + d_j \cdot t + e_j \cdot t^2} \quad (2)$$

де a_j, b_j, c_j, d_j, e_j – відповідні параметри апроксимації.

Щоб отримати функцію подібності нульової ізохрони $G_0(\varphi_0; t)$, знайдемо значення отриманих апроксимацій функцій подібності в момент часу $t = 0$. Визначена функція подібності нульової ізохрони зображена на попередньому рисунку за допомогою штрихової лінії.

Тепер для того, щоб побудувати миттєву діаграму деформування (нульову ізохрону), достатньо перемножити ізохронні криві повзучості на відповідне значення функції подібності нульової ізохрони $G_0(\varphi_0; t)$.

На наступному рисунку показані отримані миттєві діаграми деформування для усіх досліджуваних типів ниток.

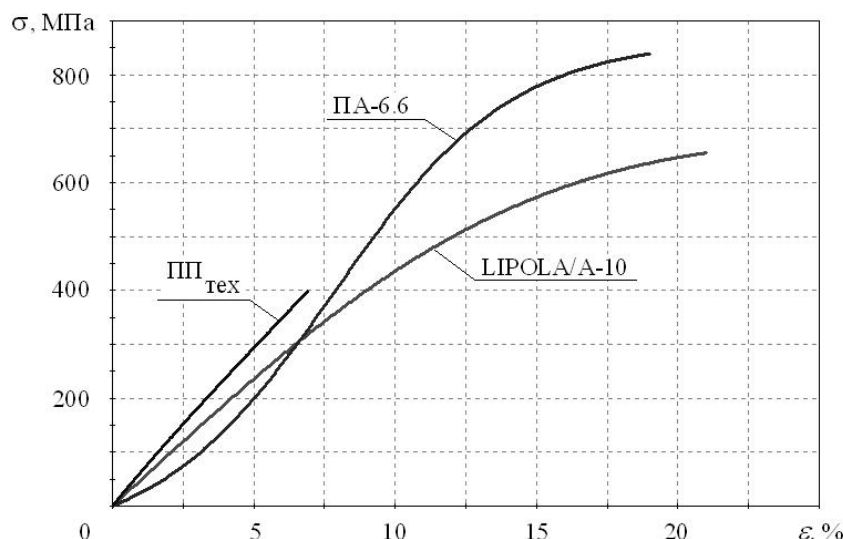


Рис. 6. Миттєві діаграми деформування поліпропіленової (LIPOLA/A-10), поліамідної (ПА-6.6) та технічної поліпропіленової (ПП_{тех}) ниток

Визначені діаграми властивостей поліпропіленових ниток загального та технічного призначень дещо відрізняються від експериментально отриманих діаграм розтягу. Тому для подальшого застосування потрібно використовувати саме діаграми миттєвого деформування з уточненими значеннями ефективних механічних характеристик досліджуваної нитки. Зокрема, границю міцності та граничну деформацію при розтязі для LIPOLA/A-10 приймемо рівними $\sigma_b = 654,9$ МПа, $\varepsilon_b = 21\%$, модуль поздовжньої пружності $E_0 = 4740$ МПа. А для технічної поліпропіленової нитки – $\sigma_b = 398$ МПа, $\varepsilon_b = 6,9\%$, $E_0 = 6200$ МПа.

Як видно з наведеного рисунка, діаграма властивостей поліамідної нитки суттєво відрізняється від кривої простого розтягу. Хоча остання дозволила досить точно визначити величини руйнівних напружень і деформацій, які приймаються рівними $\sigma_b = 830$ МПа та $\varepsilon_b = 19\%$. Окрім того для поліамідного матеріалу характерна нелінійність процесу деформування.

Стандартні випробування при статичному короткочасному навантаженні можуть надати лише орієнтовні значення механічних характеристик досліджуваних матеріалів. Це особливо стосується волокнистих полімерних структур, механічна поведінка яких суттєво залежить від виду та швидкості навантаження. Порівняння миттєвих діаграм деформування із результатами статичних короткочасних випробувань показує, наскільки значною може бути різниця між отриманими даними. Істинна поведінка матеріалу може бути визначена лише з миттєвих діаграм деформування, що інваріантні до виду напруженого стану та швидкості деформації і які можуть розглядатись як дійсні діаграми властивостей.

Список літератури

1. Перепелкин К. Е. Современные химические волокна и перспективы их применения в текстильной промышленности / К. Е. Перепелкин // Российский химический журнал. - 2002. - Т. XLVI, №1. - С. 31-48.
2. Изделия крученые и плетеные. Методы испытаний : ГОСТ 25552-82. - [Действителен от 1984-01-01]. - М. : ИПК Издательство стандартов, 1997. - 27 с.
3. Textiles - Standard atmospheres for conditioning and testing : ISO 139:2005. - [Valid from 2004-12-10]. - Geneva : ISO copyright office, 2005. - 6p.
4. Нити текстильные. Методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве : ГОСТ 6611.2-73. - [Действителен от 1976-01-01]. - М. : ИПК Издательство стандартов, 1997. - 36 с.
5. Textile fibres - Determination of breaking force and elongation at break of individual fibres : ISO 5079:1995. - [Valid from 1995-12-05]. - Geneva : ISO copyright office, 1996. - 6p.
6. Textile glass - Yarns - Determination of breaking force and breaking elongation : ISO 3341:2000. - [Valid from 2000-05-01]. - Geneva : ISO copyright office, 2000. - 7p.
7. Кудряшова Н. И. Высокоскоростное растяжение текстильных материалов / Н. И. Кудряшова, Б. А. Кудряшов. - М. : Легкая индустрия, 1974. - 271 с.
8. Kucher N. K. Nonlinear viscoelastic deformation of polypropylene threads under finite strains / N. K. Kucher, E. L. Danil'chuk // Strength of Materials. - 2009. - Vol. 41, №2. - P. 223-233.
9. Кучер Н. К. Закономерности деформирования полиамидных технических нитей на основе нейлона 6.6 / Н. К. Кучер, В. И. Скрипченко, Е. Л. Данильчук // Вестник НТУУ "КПИ" Машиностроение. - 2008. - Том 54. - С.190-198
10. Гудрамович В. С. Теория ползучести и ее приложения к расчету элементов тонкостенных конструкций / Вадим Сергеевич Гудрамович. - К. : Наукова думка, 2005. - 221 с.
11. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций / Юрий Николаевич Работнов. - М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1966. - 752 с.
12. Голуб В. П. К задаче идентификации ядер наследственности в нелинейной теории вязкоупругости / В. П. Голуб, Ю. М. Кобзарь, В. С. Рагулина // Теоретическая и прикладная механика. - 2009. - Вып. 45. - С. 39-49.